

对岩石峰值后区特性的新见解

葛修润 周百海 刘明贵
(中国科学院武汉岩土力学研究所)

摘要 岩石试件在单轴压缩条件下的应力-应变全过程曲线,在岩石力学研究与工程应用中有着重要意义。本文对“Ⅰ型”与“Ⅱ型”峰值后区曲线的形成条件进行了分析,并根据能量观点和最新的试验结果讨论了“Ⅰ型”曲线的不合理性,同时对峰值后区特性提出了新的见解。

本文中的最新试验结果是在三位作者合作研制的自适应控制岩石力学试验机上作出的。

关键词 岩石全过程曲线 峰值后区特性 岩石力学试验机

一、前 言

为了研究岩石的强度和变形特性及岩石发生破裂的发展过程,利用岩石力学试验机对圆柱形岩石试件进行压缩试验是一种基本手段。试验机对试件所施加的轴向载荷和试件轴向变形的关系曲线通常称之为力-位移曲线。在假定试件的截面积和长度在整个试验过程中均保持不变的前提下,由力-位移曲线也可方便的换算成名义上的应力-应变曲线。不管使用何种类型的试验机,均可从单轴压缩试验中获得岩石的峰值强度,但是过峰值强度点以后的力-位移曲线在实验中却不一定能成功地获得,它与所使用的试验机的性能和试验方法有关。

超过峰值强度后,岩石试件实际上仍然可具有一定的承载能力。一般说来,只有在峰值后再发生一定的变形才达到其最小值或残余强度。这种包括过峰值强度点以后的力-位移特性在内的曲线称之为全过程曲线,而过峰值强度点以后的岩石的力学特性叫做破坏后区特性或峰值后区特性。峰值后区特性在采矿实践中对于确定岩石的破裂面是否稳定是很重要的。因为采矿坑道的岩石尽管发生破裂,但“破裂的岩石”仍然能够支撑住相当大的负荷,特别是当侧面有支护时更是如此。显然,在研究矿柱的稳定性和地下巷道中发生岩爆的可能性时,对岩石的峰值后区特性作深入的了解是十

分必要的。

通过试验能否取得被研究岩石的峰值后区特性和相关的渐进破坏取决于试验机与试件的相对刚度。这里要强调一下刚度的定义:对试验机而言,刚度指的是它与试件的接触面在施力轴线上产生单位变形所对应的力。值得提出的是,这里的刚度是一个综合性的概念,它包括机械刚度和液压刚度,对闭环伺服试验机来说,还包括系统的动态特性;而试件的刚度则是指其峰值后区的刚度。关于这个问题,这里不作详细的讨论。

当我们使用“柔性”试验机时,由于过峰值强度点后的抗力变小,试验机释放出它所储存的变形能,为试件产生附加变形提供了所需的功,使试件的变形迅速地、不受控制地持续下去,直致破坏,因而无法测到峰值后区曲线。其原因就在于“柔性”试验机在其卸载过程中所释放的能量大于岩石试件在峰值后区发生完全破坏所需要的能量。

因此,要想获得峰值后区曲线,就只有加大试验机的刚度。目前一般采用以下两种途径:一是单纯增加试验机刚度,以减小系统释放给试件的变形能,这就是刚性机。由于刚性机的刚度仍不够大,操作不便且无法准确控制,它的实用价值不大;二是采用电液伺服闭环控制方式。它利用闭环系统的反馈原理来吸收试验机释放给试件的变形能,从而达到提高

试验机刚度的目的。同时也使被控制量能准确地按所需要的函数规律变化，完全实现了自动控制。这类试验机的出现，无疑是试验机发展史上的一个重大进步。

二 单轴压缩下岩石全过程曲线的分类概况

对于全过程曲线和峰值后区特性，国外学者这二十多年进行了大量的实验研究和分析，国内这十多年来也开展了一定的工作。从国内外的文献来看，将岩石的峰值后区特性区分为“Ⅰ型”和“Ⅱ型”这两个基本类型似乎已成为普遍接受的定论，也未见在这方面有什么原则性的争论。这种分类的提法来源于文献^[1]。Wawersik和Fairhurst在1970年基于他们对六种不同的岩石所作的单轴压缩试验的结果（图1）提出了将全过程曲线区分为两个基本类型（图2）。这种分类法后来又又被进一步概念化的归结为图3所示的模式。

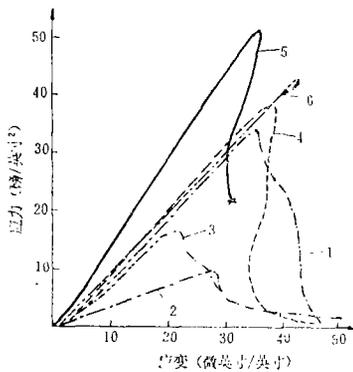


图 1 六种岩石的单轴压缩试验曲线^[1]

- | | | | |
|-----------|-------|-----------|--------|
| 1—炭质灰色花岗岩 | } I 类 | 4—炭质灰色花岗岩 | } II 类 |
| 2—印第安纳石灰岩 | | 5—玄武岩 | |
| 3—旧纳西大理岩 | | 6—含粘土石灰岩 | |

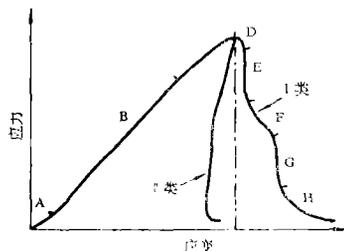


图 2 文献^[1]中建议的两类全过程曲线模式

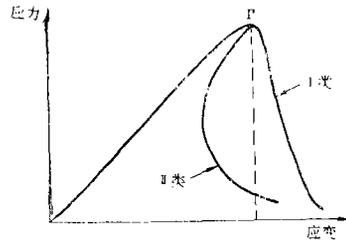


图 3 目前普遍采用的两类全过程曲线基本模式

从图2可以看出，两种基本类型的全过程曲线的差别在于峰值后区。具有Ⅱ型特性的岩石在过峰值强度点后不继续发生压缩变形，反而产生回弹。关于这一点，文献^[1]的结论部分写道：“在准静态的单轴压缩试验中所研究的应力-应变全过程曲线可以区分为两个类型。对Ⅰ型岩石而言，破裂的传播是稳定的。这意味着当承载能力逐步减少时还需要对试件作功。Ⅱ型岩石的破裂是不稳定的，或者说是自己能持续进行的。为了控制破裂，必须从其中抽取能量。否则，即使是使用绝对刚性的试验机，Ⅱ型岩石的破裂也是不能受控的。”这种观点一直被众多的文献和专著所引用并延续至今。

三、形成上述分类方法的试验条件

在岩石力学试验中，试验条件对试验结果有很大的影响。不考虑这一点，就无法得出正确的结论。因此，有必要分析一下Ⅱ型曲线产生的条件。

在文献^[1]所提到的试验中，安置了三台试件平行的辅助液压缸。过峰值强度点后，一旦试件抗力的下降趋势陡于试验机的卸载特性曲线（即试件刚度大于试验机刚度），就人为的由辅助液压缸对加荷系统施加反向作用力，使试件的变形反向直至破裂不再发展，于是又向试件施力，如此反复进行下去直到试件破坏；在使用闭环控制试验机时，对于脆性岩类都是在过峰值强度点后采用横向变形率作为控制量。由于在峰值后区岩石的横向变形与轴向变形之间并无确定的函数关系，因而在这种控制条件下，轴向变形处于一种不断变化的状态。以上试验方式所获得的Ⅱ型曲线只是在一种复

杂的轴向变形状态下所作出的曲线的外包络线而已。由于轴向变形的方向和变形率的大小对岩石的峰值后区特性有很大的影响，尤其是变形方向的反复变化，会使试件一直处于反复的不确定的加载—卸载状态，因而很难把在这种状态下得出的Ⅱ型曲线看作是脆性岩类本性的反映。

我们可以进一步从能量观点来分析图 2 所示的全过程曲线。过峰值强度点 D 所作的垂线（点划线）是一条分界线。如果后区曲线在其右侧，即所谓的Ⅰ型曲线，这意味着岩石试件在破坏过程中尚需补充能量。如在其左侧，即所谓的Ⅱ型曲线，对这类岩石而言，过峰值点后不仅不需要补充能量，还必须从岩石试件中“抽取”能量，破裂过程才能得到控制。关于这一点，文献^[1]的结论部分已经作了肯定。

如果Ⅱ型曲线确实是脆性岩类自身所固有的特性，则由此导出的逻辑推论应该是：无论用什么样的试验机，具有Ⅱ型特性曲线的脆性岩类在纵向变形率保持常数的条件下，也就是在纵向变形持续、单调、匀速增长的条件下，其破裂发展过程在过峰值点以后是不可能受控的。

要证明Ⅱ型曲线的不合理性，就必须在纵向变形率保持常数的条件下取得脆性岩类的后区特性曲线。而要做到这一点，对试验机的刚度有很高的要求。目前所使用的电液伺服试验机达不到这个要求。因此，必须研制出性能更好的试验机。

四、新一代的电液伺服自适应控制岩石力学试验机及新的试验结果

前面已经提到，对闭环伺服控制试验机来说，其刚度包括系统的动态特性。而动态特性又与液压系统的设计、校正环节的参数以及试件的力学特性密切相关。由于岩石力学试验机的试验对象经常改变，同时试件本身的力学特性在试验过程中也在不断变化，尤其在峰值后区更是如此。一般的闭环伺服控制试验机，无论是模拟控制的还是计算机控制的，都无法适应这种情况。其具体的体现就是动态特性不

好，故而影响到试验机的刚度与稳定性。

针对以上的问题，我们研制了新一代的自适应控制岩石力学试验机，这台试验机有以下特点。

1. 多功能

采用了独特的设计方法，没有很大的刚性构件，可以进行多种力学试验。如：单轴、三轴的压缩和拉伸试验；直剪试验；各种波形的疲劳试验；断裂力学试验等等。

2. 高频响

在设计上采用了多种先进技术与合理的措施，保证了系统的高频响特性，其疲劳试验频率可达 30Hz 以上。同时，也尽可能地降低了消耗。

3. 自适应

采用了先进的自适应控制方式，全部控制功能由计算机实现，它能在试验过程中不断进行系统辨识并自动寻优。换句话说，无论岩石试件的力学特性如何变化，都能保证系统在试验过程中始终处于最优控制状态。

目前，我们已经利用这台试验机对许多不

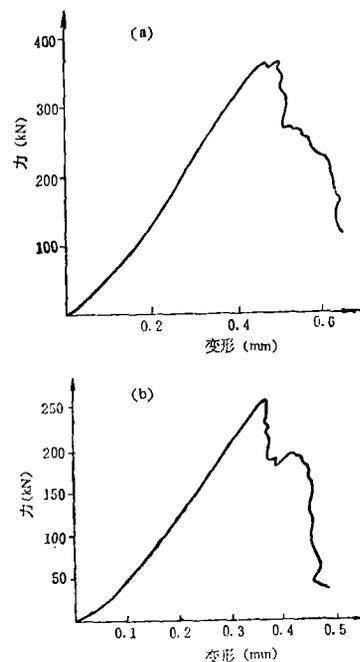


图 4 典型脆性岩石的全过程曲线
(a) 变质砂岩；(b) 石英闪长岩

同岩性的岩石试件进行了单轴压缩试验。特别要指出的是,在轴向变形率保持常数的条件下,对几乎各种脆性岩石都作出令人满意的峰值后区曲线。图4所示为几种典型脆性岩石的全过程曲线。这几种岩石按前述归类法属于Ⅱ型岩类,但由图4可知,它们在轴向变形率为常数的条件下得到了完全不同的后区曲线。因此,这些试验结果充分证明了所谓Ⅱ型曲线的不合理性。

五、关于岩石峰值后区特性的新见解

综上所述,我们根据最新的试验结果可以得出以下结论:对绝大部分过去归于Ⅱ型岩类的脆性岩石来说,在轴向变形率保持常数的条件下其破裂过程是可以控制的,是可以取得完美的峰值后区曲线的。因此,前述的Ⅰ型、Ⅱ型分类法是不合理的。我们建议采用图5所示的模型。过峰值强度点P所作的垂线为极限线,在轴向变形率保持常数的条件下,绝大部分岩石的后区特性曲线均在其右侧。越是脆性的岩石其曲线的坡度越陡(即越逼近极限线),且其曲线上有明显的台阶状。这是由于突然的局部破裂造成抗力急剧下降所致。而韧性越大的岩石其后区曲线的坡度越平缓。当然也有破裂过程无法控制的特例,这类岩石的后

区曲线就与极限线相重合了。不过,随着试验机的不断完善和相应技术的不断提高,相信这种特例会越来越少。

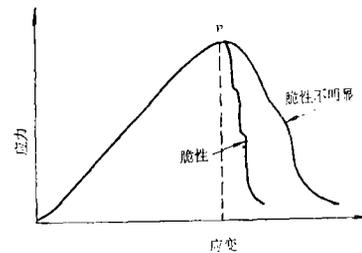


图5 岩石全过程曲线的新模型

参 考 文 献

- (1) W. R. Wawersik and C. Fairhurst, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1970 Vol.7, p561~575
- (2) M. S. 佩特森,《实验岩石形变——脆性域》,张崇寿译,地质出版社 1982
- (3) B. H. G. 布雷迪和 E. T. 布朗,《地下采矿岩石力学》冯树仁译,煤炭工业出版社 1990
- (4) 李先炜,《岩块力学性质》,煤炭工业出版社 1983
- (5) 吴玉山 林卓英 《岩土工程学报》, 1987, Vol.9 No1
- (6) 陶振宇,潘别桐,《岩石力学原理与方法》,中国地质大学出版社,1991

(收稿日期 1992年6月9日)

作者简介 葛修润 中国科学院武汉岩土力学研究所研究员

A NEW UNDERSTANDING OF POST-FAILURE BEHAVIOUR OF ROCK

Ge Xiurun Zhou Baihai Liu Minggui

(Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, the Academy of Sciences of China)

ABSTRACT

The complete stress-strain curve of rock specimens under uniaxial compression is of significant importance in the geomechanical research and engineering application. In this paper analysis is made on the conditions, under which the post-failure curves of type I and type II are formed, and from the viewpoint of energy, based on the newest experimental data, a discussion is conducted, which shows the irrationality of the curve of type II. A new opinion on the post-failure behaviour is presented.

The newest experimental results used here are obtained by means of the test machine of adaptive control for the purposes of rock mechanics, which is developed by the authors of paper.

KEYWORDS: Complete curve of rock, Post-failure behaviour, Test machine for rock mechanics.